

AVALIAÇÃO ESPACIAL DE PADRÕES DE COMPORTAMENTO DA QUALIDADE DO AR DA CIDADE DE SÃO PAULO-SP UTILIZANDO ANÁLISE MULTIVARIADA

Palavras-Chave: Análise de *Cluster*, Material particulado, Monitoramento ambiental.

Autores:

Sophia Molina Fernandes, FT - UNICAMP

Prof^ª. Dr^ª. Simone Andrea Pozza (orientadora), FT - UNICAMP

Dr. Danilo Covaes Nogarotto (coorientador), FT - UNICAMP

INTRODUÇÃO

Os poluentes atmosféricos são substâncias encontradas no ar que causam danos à saúde e ao meio ambiente. Suas principais fontes são antrópicas e têm maiores concentrações em áreas urbanizadas (CETESB, 2025a).

Poluentes atmosféricos são utilizados como indicadores de qualidade do ar. Dentre eles, o Material Particulado (MP), que é classificado de acordo com seu diâmetro aerodinâmico, em Partículas Inaláveis (MP₁₀) e Partículas Inaláveis Finas (MP_{2,5}) (CETESB, 2025a). Em geral são uma mistura de líquidos e sólidos, estes podendo ser orgânicos ou inorgânicos. Estão relacionadas a doenças respiratórias e cardiovasculares, principalmente quando existe longa exposição a estes poluentes. Os impactos das MPs têm recebido maior atenção mundialmente, e em consequência, a importância das pesquisas sobre seus comportamentos têm aumentado (GODOY e DA SILVA, 2022; LI *et al.*, 2009).

A aplicação de estatística multivariada em avaliações espaciais tem sido utilizada em estudos de poluentes atmosféricos. Diversos estudos já utilizaram da Análise de *Cluster* para agrupar as estações de monitoramento de acordo com poluentes atmosféricos. A ideia geral é identificar agrupamentos de estações com as mesmas características de fontes emissoras (HE *et al.*, 2018; REPRESA *et al.*, 2020; GODOY *et al.*, 2021).

São Paulo (SP) é o município mais populoso do país com população ultrapassando 11 milhões de pessoas (IBGE, 2025), sua poluição atmosférica ultrapassa os padrões de poluentes orientados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (WHO, 2022) há 22 anos nos indicadores de Material Particulado, Ozônio e Dióxido de Nitrogênio (IEMA, 2022).

Este trabalho teve como objetivo avaliar os padrões de comportamento da qualidade do ar na cidade de São Paulo-SP por meio de Análise de *Cluster*, comparando dados de MP₁₀ e MP_{2,5} de diferentes estações de monitoramento de ar e identificar possíveis fontes emissoras de acordo com as características dos agrupamentos.

METODOLOGIA

Os dados foram coletados das 17 redes automáticas de cada estação, disponibilizados online pela base de dados QUALAR (CETESB, 2025b). Os dados horários fornecidos foram tratados no Excel, sendo utilizadas as médias mensais de concentração dos poluentes para a análise. O período adotado foi de 1 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2022. A análise foi feita com foco nas frações MP₁₀ e MP_{2,5} de material particulado, com o uso dos poluentes O₃, NO, NO₂ e NO_x para posterior avaliação.

Para a análise de dados, optou-se pela Análise de *Cluster*, com método de Ward, que permite identificar padrões e distribuições de dados, agrupando conjuntos de dados com base em suas características e medindo a similaridade entre eles por meio da distância euclidiana, fazendo que quanto mais semelhantes os dados, menor será a sua distância (GOVENDER e SIVAKUMAR, 2019). Neste estudo, as concentrações de MP₁₀ e MP_{2,5} das

estações são comparadas entre si e agrupadas conforme seus níveis de similaridade, resultando em dendrogramas, onde estão contidas as estações mais parecidas (DOMINICK *et al.*, 2012).

Foram feitas duas análises, cada uma com foco em um material particulado. A primeira análise foi feita com os dados de concentração do MP₁₀ e a segunda com os dados de concentração de MP_{2,5}. Na seleção entre as 17 estações para cada análise, foram usadas somente as que possuem dados disponíveis de MP₁₀ e de MP_{2,5} no período de monitoramento completo de 2015 a 2022 e que a quantidade de dados faltantes é menor que 30% para MP₁₀ e MP_{2,5}.

Para a primeira Análise de *Cluster* (para o MP₁₀), foram utilizadas as estações Capão Redondo, Cerqueira César, Congonhas, Grajaú-Parelheiros, Interlagos, Itaim Paulista, Marginal Tietê - Ponte dos Remédios, Nossa Senhora do Ó, Parque Dom Pedro II e Santo Amaro. Para a segunda Análise de *Cluster* (para o MP_{2,5}) foram usadas as estações Cidade Universitária - USP - Ipen, Congonhas, Grajaú-Parelheiros, Ibirapuera, Itaim Paulista, Marginal Tietê - Ponte dos Remédios. A análise de cluster, foi feita usando o software R, na sua versão 4.4.1 (R Core Team, 2024) para a manipulação dos dados de média mensal de concentração de MP₁₀ e MP_{2,5}.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dendrogramas (Figura 1a e 1b) representam os *clusters* formados para cada análise, onde as estações dentro de cada foram agrupadas por semelhanças nos seus dados de concentrações de MP₁₀ e de MP_{2,5} respectivamente. Na primeira análise, foram usados somente as concentrações de MP₁₀, resultando em três *clusters* (1, 2 e 3). Na segunda análise foram usados os dados de MP_{2,5}, gerando dois *clusters* (4 e 5).

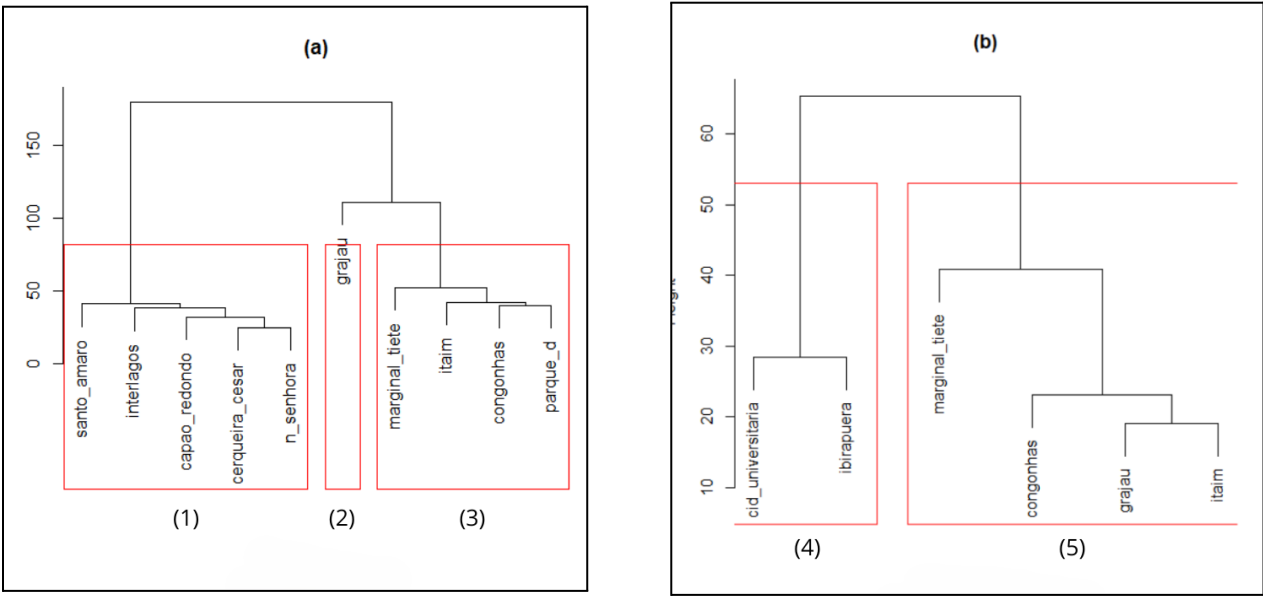


Figura 1 - Dendrograma dos *clusters* de estações de monitoramento do ar para (a) MP₁₀ e (b) MP_{2,5}.

Cluster	1 (MP ₁₀)	2 (MP ₁₀)	3 (MP ₁₀)	4 (MP _{2,5})	5 (MP _{2,5})
Média	24,81	34,95	29,67	14,00	17,55
Mínimo	9,99	17,48	16,01	6,75	7,62
Máximo	51,06	76,90	68,88	30,39	39,90
Correlação com O ₃	-0,18	0,03	-0,17	-0,26	0,01
Correlação com NO	0,60	0,62	0,46	0,57	0,61
Correlação com NO ₂	0,76	0,72	0,42	0,73	0,51
Correlação com NO _x	0,68	0,68	0,46	0,65	0,60

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das médias mensais de MP₁₀ e MP_{2,5} (µg/m³) dos *clusters*.

A estação de Congonhas foi agrupada nos *clusters* 3 e 5 (Figura 1a e 1b), ambos com altas concentrações de MP_{10} e $MP_{2,5}$, (Tabela 1) respectivamente, se comparados aos demais *clusters*. A estação tem proximidade com o Aeroporto de Congonhas e avenidas movimentadas onde existe a constante presença de veículos automotores, ambas são fontes de MP_{10} e $MP_{2,5}$ pela queima de combustíveis fósseis de automóveis e aeronaves (BRASIL, 2023; CETESB, 2025a), possivelmente influenciando nos valores de concentração da região de monitoramento da estação.

A estação de Grajaú-Parelheiros foi agrupada sozinha na análise de MP_{10} , no *cluster* 1 (Figura 1a), tendo os maiores valores de Médias, Mínimas e Máximas de MP_{10} entre os três *clusters* (Tabela 1). Na segunda análise, a estação encontra-se no *cluster* 5 (Figura 1b), onde as estações apresentaram também os maiores valores de Médias, Mínimas e Máximas de $MP_{2,5}$ entre os *clusters* (Tabela 1). Esta é a estação que está mais afastada do centro, localizada no sul da cidade e está localizada a aproximadamente 1,2 km de uma pedreira de basalto, que emite grandes quantidades de material particulado durante sua extração, assim como a ressuspensão de poeira durante seu transporte (INGRAO *et al.*, 2014; PONTES *et al.*, 2016).

No *cluster* 4 foram agrupadas duas estações (Figura 1b) que apresentaram as menores médias concentrações de $MP_{2,5}$ entre os *clusters* (Tabela 1), ainda que suas estações estejam próximas de avenidas com fluxo intenso de carros. A causa disto por ser atrelada à localização das estações, que são em áreas verdes (USP e Parque Ibirapuera). A presença de vegetações mais densas, como em áreas verdes que possuem grandes números de árvores, apresentam capacidade de remover poluentes da atmosfera, auxiliando na diminuição de suas concentrações em áreas com tráfego intenso. Gases poluentes como NO_2 , O_3 , SO_2 são absorvidos pelas folhas, e os materiais particulados, tanto MP_{10} quanto $MP_{2,5}$, são aderidos à superfície das folhas (NOWAK *et al.*, 2014, MARTINS *et al.*, 2021).

Os *clusters* em sua maioria apontam sua principal fonte emissora dos materiais particulados a emissão veicular. O *cluster* 1 tem todas as suas estações próximas a regiões como avenidas e estradas que possuem grande fluxo de veículos automotores. O *cluster* 3 tem suas estações próximas a avenidas com constantes fluxo de carros, terminais de ônibus e comércios. As estações do *cluster* 5 estão próximas a avenidas com grande fluxo de veículos, comércios e indústrias automobilísticas. Essa semelhança entre os agrupamentos indica a influência significativa que a emissão proveniente de veículos tem nas áreas das estações, visto que a combustão de combustíveis fósseis têm capacidade de emissão de MP_{10} e $MP_{2,5}$ (DRUMM *et al.*, 201; DALLMAN, 2019).

Para uma melhor análise, foram feitas correlações entre os MPs e outros poluentes atmosféricos, como O_3 , NO, NO_2 e NO_x , para maior entendimento das possíveis fontes de emissão (Tabela 1).

Os *clusters* 1, 3 e 4 apresentam correlações negativas e fracas com O_3 e correlações positivas fortes/moderadas com NO, NO_2 e NO_x , o que pode indicar o consumo do O_3 para a formação de NO_2 , que é um dos precursores de MPs (CETESB, 2025a). Os *clusters* 2 e 5 tem correlação próxima a zero com o O_3 , porém correlações fortes/moderadas com NO, NO_2 e NO_x , o que indica a maior influência dos NOs, como é apresentado na Tabela 1, retirando a influência do O_3 sobre o comportamento dos MPs.

Como os NOs, são poluentes de fonte primária ligados à combustão de combustíveis fósseis (SEINFELD e PANDIS, 2006), consolida-se que a emissão dos MPs é proveniente de emissões veiculares. Este resultado já é esperado, visto que a cidade de Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) tem uma frota veicular de cerca de 7 milhões e emissões de 4000 toneladas de MP altas de poluentes de acordo com a estimativa do Relatório da CETESB (CETESB, 2024).

De acordo com os Padrões Estaduais de Qualidade do Ar estabelecidos pelo Decreto Estadual nº59113/2013, os valores vigentes para são de $100\mu g/m^3$ para MP_{10} e $50\mu g/m^3$ para $MP_{2,5}$ (SÃO PAULO, 2013). Comparando com os valores Médios, Mínimos e Máximos de concentração de ambos os MPs (Tabela 1), nenhum *cluster* ultrapassou os padrões em vigência.

CONCLUSÕES

O estudo identificou padrões de comportamento distintos de MP_{10} e $MP_{2,5}$ no município de São Paulo através da análise de *cluster*. Foram resultantes das duas análises: três *clusters* para concentrações de MP_{10} e dois *clusters* para as concentrações de $MP_{2,5}$. Dessa forma, foram identificadas as possíveis fontes emissoras dos materiais particulados.

De forma geral, as emissões veiculares são as principais fontes de emissão para ambos os MPs. Os *clusters* 1, 3 e 5 têm contato direto com áreas com intenso fluxo de veículos. A Estação de Congonhas (*cluster* 1 e 5) apresentou como possível fonte, além da emissão proveniente de veículos, a emissão pela combustão de combustíveis de aeronaves, pela presença do aeroporto próximo à estação de monitoramento.

A estação de Grajaú-Parelheiros (*cluster* 2 e 5), apresentou concentrações altas para os MPs, com possível fonte de pedreira localizada próxima a região do monitoramento.

O *cluster* 4 também tem influência de emissões veiculares, porém seu comportamento se difere dos demais *clusters* pela presença de áreas verdes no entorno de suas estações, o que ocasionou na diminuição da concentração dos poluentes atmosféricos.

Com os resultados obtidos a partir das análises de MP_{10} e $MP_{2,5}$ das estações de monitoramento do ar no município de São Paulo entre 2015 e 2022, foi possível apresentar a interferência significativa que as emissões veiculares tem na qualidade do ar da cidade, sendo esta a principal fonte de emissão dos poluentes atmosféricos na região.

BIBLIOGRAFIA

- BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Guia de qualidade do ar local**. Brasília, DF: ANAC, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/arquivos/GuiaQualidadedoArLocal.pdf>. Acesso em: julho de 2025.
- CETESB. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2025/06/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2024.pdf>. Acesso em: julho de 2025.
- CETESB. **Qualidade do Ar – Poluentes**. São Paulo: CETESB, 2025a. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: julho de 2025.
- CETESB. **QUALAR: sistema de informações da qualidade do ar**. São Paulo: CETESB, 2025b. 1 banco de dados eletrônicos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>. Acesso em: julho de 2025.
- DALLMANN, T. Benefícios de tecnologias de ônibus em termos de emissões de poluentes do ar e do clima em São Paulo. **The International Council of Clean Transportation-TICCT**, 2019
- DE PONTES, J. C. et al. Impactos ambientais do desmonte de rocha com uso de explosivos em pedreira de granito de Caicó-RN. **Geosciences= Geociências**, v. 35, n. 2, p. 267-276, 2016.
- DOMINICK, D., JUAHIR, H., LATIF, M. T., ZAIN, S. M., & ARIS, A. Z. (2012). Spatial assessment of air quality patterns in Malaysia using multivariate analysis. **Atmospheric Environment**, 60, 172–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.021>.
- DRUMM, F. C. et al. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 66-78, 2014.
- GODOY, A. R. L. et al. Application of machine learning algorithms to PM_{2.5} concentration analysis in the state of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 56, n. 1, p. 152-165, 2021.
- GODOY, A. R. L.; DA SILVA, A. E. A. Spatial patterns and temporal variations of pollutants at 56 air quality monitoring stations in the state of São Paulo, Brazil. **Environmental monitoring and assessment**, v. 194, n. 12, p. 910, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10600-z>

GOVENDER, P.; SIVAKUMAR, V. Application of k-means and hierarchical clustering techniques for analysis of air pollution: A review (1980–2019). **Atmospheric pollution research**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 40–56, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.009>

HE, H. et al. Prediction of PM_{2.5} concentration based on the similarity in air quality monitoring network. **Building and Environment**, v. 137, p. 11-17, 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>> Acesso em: julho de 2025.

INGRAO, C. et al. The use of basalt aggregates in the production of concrete for the prefabrication industry: Environmental impact assessment, interpretation and improvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 75, p. 195-204, 2014.

Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). **Cidade de São Paulo tem poluição do ar acima do recomendado pela OMS nos últimos 22 anos**. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/cidade-de-sao-paulo-tem-poluicao-do-ar-acima-do-recomendado-pela-oms-nos-ultimos-22-anos-20220526>>. Acesso em: julho de 2025.

LI, W.; BAI, Z.; LIU, A.; CHEN, J.; CHEN, L.. Characteristics of major PM_{2.5} components during winter in Tianjin, China. **Aerosol and air quality research**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 105–119, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03655554>

MARTINS, A. P. G. et al. Infraestrutura verde para monitorar e minimizar os impactos da poluição atmosférica. **Estudos Avançados**, v. 35, p. 31-57, 2021.

NOWAK, D. J. et al. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. **Environmental pollution**, v. 193, p. 119-129, 2014.

R Core Team (2025). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

REPRESA, N. S. et al. Data mining paradigm in the study of air quality. **Environmental Processes**, v. 7, n. 1, p. 1-21, 2020.

SEINFELD, J.H., PANDIS, S. N. (2006). Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. Third edition.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 59.113, de 23 de abril de 2013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado de São Paulo, SP, 24 abr. 2013. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>. Acesso em: julho de 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Ambient (outdoor) air pollution, 2022. Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw3NyxBhBmEiwAyofDYb2TWPKO2DDRY7rqbH8xycxliepQJGKzcM5mtU6dMGDVE9sRQbvMhoC53wQAvD_BwE](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw3NyxBhBmEiwAyofDYb2TWPKO2DDRY7rqbH8xycxliepQJGKzcM5mtU6dMGDVE9sRQbvMhoC53wQAvD_BwE)> Acesso em: julho de 2025.